

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

The physical foundations of the Magnetic Memory Method of NDT

**Roberto Suárez-Ántola, Doctor of Sciences, P. Nuclear Engineering.
Diego Suárez-Bagnasco, Electronic Engineer.**

**Department of Electrical Engineering, School of Engineering and Technologies,
Catholic University of Uruguay**

Contact address: dsuarezb@adinet.com.uy

Summary

The magnetic memory method (MMM) of non-destructive inspection is based on the analysis of the distribution of scattering magnetic fields (SMF) which result from strains and structural changes produced during fabrication. The method was developed by Professor A. Dubov in Moscow and has been used for several decades in Russia, the former East Germany, Poland, Ukraine, Bulgaria, Yugoslavia, China, India, and other countries. In this paper, the authors review some aspects of the physical foundations of the method and its relation with several well known phenomena that link the magnetic field with stress and strain fields in metals (mainly ferromagnetic). A brief discussion of technical interest about the possibility of an indirect measure of stresses in metal bodies using measured values of scattering magnetic fields is given.

Keywords: scattering magnetic field, linear and non-linear magneto-elastic effect, dislocations, stress, strain.

Introduction

The purpose of this paper is to review and discuss some of the foundations of a new magnetic NDT method, known as the Magnetic Memory Method.

The concept of Metal Magnetic Memory was first introduced by Anatoli Dubov in 1994 (Dubov, 2004). Apparently, before that time it seems that it was not used in the technical literature, in the sense in which it is now used in NDT.

The uniqueness of the metal magnetic memory method is that it is based on use of the scattering magnetic field (SMF). This SMF appears broadly under two circumstances. In first place, it appears when the temperature of a ferromagnetic metallic body is above Curie's temperature and it cools down below the abovementioned temperature to ambient temperature. The resulting magnetization presents non-uniformities related to structural heterogeneities that modify the pattern of magnetic domains produced due to the Earth magnetic fields. These non-uniformities are very significant, even in the case in which the ferromagnetic body cools down in weak magnetic fields as the Earth's magnetic one. In second place, but equally important, a non-uniform magnetization appears in regions with steady dislocation patterns, produced during plastic sliding by local stresses induced by working loads action. In both cases the variations of magnetization from one point to another in the material is correlated with a measurable variation in the scattering magnetic field in the surface of the body. It seems that it is very difficult, if not impossible, to obtain information from SMF with artificial magnetization in working constructions. Such information is available and can be obtained only in a small external field, as the Earth magnetic field. This is so because a correlation exists between the density of elastic or elastic-plastic strain energy and the density of induced magnetic field energy. The measurable effect over the SMF is higher when the density of magnetic energy produced by local strains in dislocation patterns is at least of the same order of magnitude as the density of magnetic energy of the bulk of the material. In a strong external field this last energy density may be so high

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

that in the SMF the perturbation due to the structural defect may pass unnoticed. It is shown in practical works that MMM can be used both during equipment operation and after working loads relief

during the repairs. Magnetic texture, formed under the action of working loads, becomes frozen after unloading by virtue of the same mechanisms of magnetic dislocation hysteresis that explain hysteresis loops. Thus, there appears a unique possibility to evaluate the actual stress-strained state of the equipment and to reveal at an early stage maximal damage zones in metal by measuring SMF using suitable equipment. Moreover, also by measuring SMF, it is possible to assess the quality of new machine-building products directly after their manufacturing.

In Figure 1 we can see one piece of equipment used to measure SMF on the surface of ferromagnetic bodies. In this case it is being used to inspect butt welded joints of a pipe.

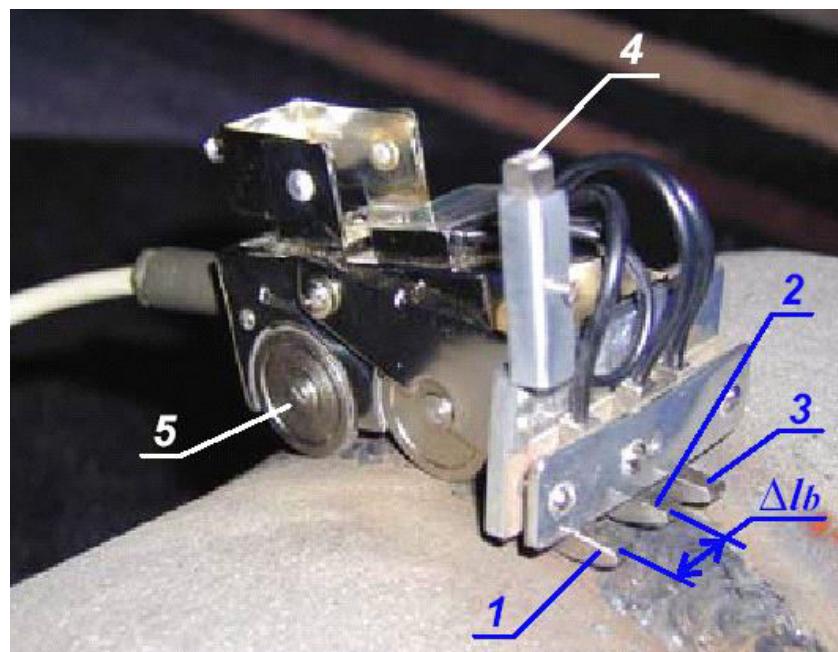


Figure 1 References 1, 2, 3: flux-gate transducers of the scanner that measure the SMF plus the external magnetic field. 4: flux gate transducer that measure the external magnetic field only. 5: wheels and length meter. Δl_b : distance between flux-gate transducers.

Special scanning equipment including not only the known flux-gate sensors but also the length meter, analogue to digital converter (ADC), the processor and other devices was first developed to register local micron SMF areas. The MMM characteristics thus obtained correlated well with stress concentration zones thus detected. Such scanning devices have never been used in other magnetic NDT methods before the MMM birth (there are no analogues in the world). Scanning devices and the control method are patented in Russia, Germany and Poland.

Description of the method as applied to NDT welding inspection: basic definitions according to an ISO standard draft

Metal Magnetic Memory method (MMM)

Method of non-destructive inspection based on the analysis of the distribution of scattering magnetic fields (SMF) on product surfaces which result from strains and structural changes formed during welding. The SMF represents the residual magnetization of welded joints after their manufacture and cooling in the Earth's magnetic field.

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

Scattering magnetic field (SMF)

Is the scattering magnetic field measurable on a surface of products and welded joints.

Stress concentration zone (SCZ)

Contour on a product surface limited by a line of change of the sign of SMF normal component (or zero value of SMF). The SCZ is characterized by an abrupt local change of magnetization value ΔM relative to a matrix magnetization M_0 that appears as an abrupt "splash" of SMF. It is formed in areas of defect concentrations of metal and impurities when a welded joint is cooled below the Curie point in the Earth's magnetic field.

Magneto-mechanical hysteresis

Hysteresis stipulated by domain boundaries fixing on dislocation pile-ups and other structural heterogeneities during natural magnetization of welded joint metal as it cools below the Curie point in the Earth's magnetic field.

Intensity of scattering magnetic field (H_p [A/m])

The numerical characteristic (parameter) of magnetic field intensity measured on the surface of a welded joint.

Coefficient of intensity of scattering magnetic field change (K_{in} [A/m²])

The gradient of the measurable H_p field, the ratio of the module of a magnetic field H_p difference to the distance between the corresponding two points on the surface of the tested body

Magnetic parameter of deformability of metal (m)

The ratio of a maximum field gradient (K_{in}^{max}) to its medium value (K_{in}^{med})

The parameter m can be obtained from laboratory and industrial investigations.

Channel of H_p field measurements (H_1 , H_2 etc.)

The magnetic field intensity measured by one flux-gate transducer. Such designation of a measurable field is used in the multi-channel condition of measurement (two and more flux-gate transducers).

Discreteness of H_p field recording (Δl_k)

Step of scanning by flux-gate transducer or distance between two adjacent points of an inspection for each measurements channel

Basic distance (Δl_b)

Distance between two channels (flux-gate transducers) of magnetic field H_p measurements.

The same empirical parameters are used to describe the SMF for other applications.

Foundations of the method: basic physical principles

Domain structure: a qualitative approach

Ferromagnetism is associated with the exchange forces which hold atoms in place in the metal lattice. In certain metals, such as iron, nickel, cobalt, gadolinium and the Heusler alloys, the exchange energy and the different magnetization energies organize these atoms into microscopic groups called

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

domains. There are usually a large number of domains within each metal grain. Within each domain, the magnetization is saturated, that is, the spins of the magnetically important internal electrons of all the atoms are aligned. The domain acts magnetically as though it were a single atom. It can rotate. Moreover, it can grow and shrink (Kittel, 1990).

Before magnetization, the directions of the individual domains are randomly distributed. When an external magnetic field is applied, two independent processes account for the magnetic response of the material. The first process is the growth, by boundary displacement, of domains which are favourably oriented with respect to the field at the expense of domains not so favourably oriented. The second process predominates at field strengths approaching saturation and is unimportant in weak fields, is the rotation of the direction of magnetization of the domains into the direction of the applied field. Predominating in different parts of the magnetization cycle, these processes account for the non-linear shape of the familiar hysteresis curve of a material (Wert and Thomson, 1970).

Magneto-elastic effects: a thermodynamic approach

As early as 1864, E. Villari observed that mechanical loads alter the magnetic properties of ferromagnetic materials. The magnetic effects of internal or applied stresses are known to be closely associated with the well-known phenomenon of magnetostriction, discovered by Joule in 1847. For a historical approach to magnetostriction and magneto-elastic effects, see Hunt (1954). Magnetostriction is the change of dimensions of ferromagnetic materials upon magnetization. It is not unreasonable therefore that strain conversely should result in changed magnetic properties. Stress effects then may be thought of as inverse magnetostriction. If changes are small enough to be reversible, a relationship can be derived from thermodynamic principles, between tensile stress σ , strain ϵ (here change in length per unit length), magnetic field strength H and magnetic induction B , as follows (Mason, 1958; Vonsovskii, 1975; Herpin, 1968):

$$\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial H} \right)_{T,P,\sigma} = \left(\frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{T,P,H} \quad [1]$$

(both partial derivatives taken at constant temperature and pressure)

$$\lambda_s = \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial H} \right)_{T,P,\sigma}$$

is known as the magnetostriction. This equation shows that when λ_s is positive, as it is, for example, in iron and permalloy, B will increase with applied tensile stress for a fixed value of H . When λ_s is negative, as it is in nickel, B will decrease. Equation [1] applies only over the comparatively small range of reversible permeability. This is the range of applied fields and stresses within which domain boundaries can still return to their original position when the field or stress is released.

Since stress is a source of potential energy, the origin of its influence on magnetic properties lies necessarily in the fact that stress changes the energy condition of the domains. In addition, several other factors contribute to the energy of the domain. These include exchange forces between atoms in the lattice, the thermal motion of these atoms, magnetic energy stored in the field surrounding each domain, crystal anisotropy and the presence of impurities and lattice imperfections. Any magnetic response of the material to applied forces and fields will invariably be due to a re-adjustment of the size and orientation of the domains so that their energy will be a minimum under the applied conditions (the thermodynamic theory of magnetic domains was developed by Landau and Lifchitz in 1935 (Landau and Lifchitz, 1969)).

If λ_s is positive and the applied stress tensile, then the domains will tend to line up with the stress direction. However, if λ_s is negative, the domains will orient themselves more nearly perpendicular to

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

the stress. In the meantime, the applied magnetic field is trying to line up the domains in the field direction. If this direction differs from that of the domain stress orientation there will be a competition between them. A third effect operating on the domains is the crystal anisotropy, which tends to line up the domains along certain preferred crystallographic axes. The thermal energy of the lattice tries to destroy the magnetization by randomizing the spin directions of the individual atoms (it succeeds in

this above the Curie temperature). Suffering the effects of the abovementioned factors, the domains orient themselves in a configuration of lowest energy. Because the price of lining up in any direction is paid in terms of increased energy of the domains, complete alignment is approached only under intense applied fields or stresses.

Now,

$$B = \mu_0 H + M \quad [2]$$

Then

$$\left(\frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{T,P,H} = \left(\frac{\partial M}{\partial \sigma} \right)_{T,P,H} \quad [3]$$

Equation [3] jointly with equation [2] shows that local variation in stresses produce a local variation in magnetization. However, magnetization is a measure of the relative ease with which the applied magnetic field can line up the domains.

The scattering magnetic fields

From equations [1] and [3] it follows that λ_s measures the sensitivity of magnetization M to a variation in local stress σ . In order to see how this variation can be used for NDT purpose, let us suppose that the material is in a relatively weak external magnetic field, such as earth's magnetic field. Let us suppose also that the material is above its Curie's temperature. Then it begins to cool down. When the temperature is below Curie's point, a macroscopic magnetization emerges, produced by the external field and due to the abovementioned domain structure. When significant defects in the material modify the stress distribution, producing internal stresses or modifying external ones, the local macroscopic magnetization correspondingly varies. Then, according to equation [2], magnetic induction B varies. If such a variation is big enough, it can be measured, and the measured induction can be correlated with the presence of significant defects in the ferromagnetic material. The spatial variations of magnetization due to applied or internal stresses produce corresponding spatial variations in the so called scattering magnetic field. This field is the leakage magnetic field in the air surrounding the magnetized body. Due to the effect of well-known boundary conditions (Landau and Lifchitz, 1969) both the magnetic field and the magnetic induction in air are almost normal to the air-solid interface. However, inside the material, magnetic induction \vec{B} is almost parallel to the interface. Let us consider two points in the air-solid interface, near enough to each other. Due to the restriction $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, a variation of the tangential component of \vec{B} must be compensated by an equal and opposite variation in its normal component. But the normal component of \vec{B} in the material is equal to the normal component of \vec{B} in air. Therefore, if magnetization varies inside the body from point to point, parallel to the interface, the normal magnetic field in air $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}$ suffers a

corresponding variation. This variation can be measured displacing a magnetometer over the interface and obtaining the corresponding scattering magnetic field gradient.

This is the physical foundation of Magnetic Memory Method for non-destructive testing of materials (see also Vlasov, 2003).

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

Figure 2 shows the results of the calculus of the component of the magnetic field in air near the surface of a cylindrical ferromagnetic pipe, normal to pipe's surface.

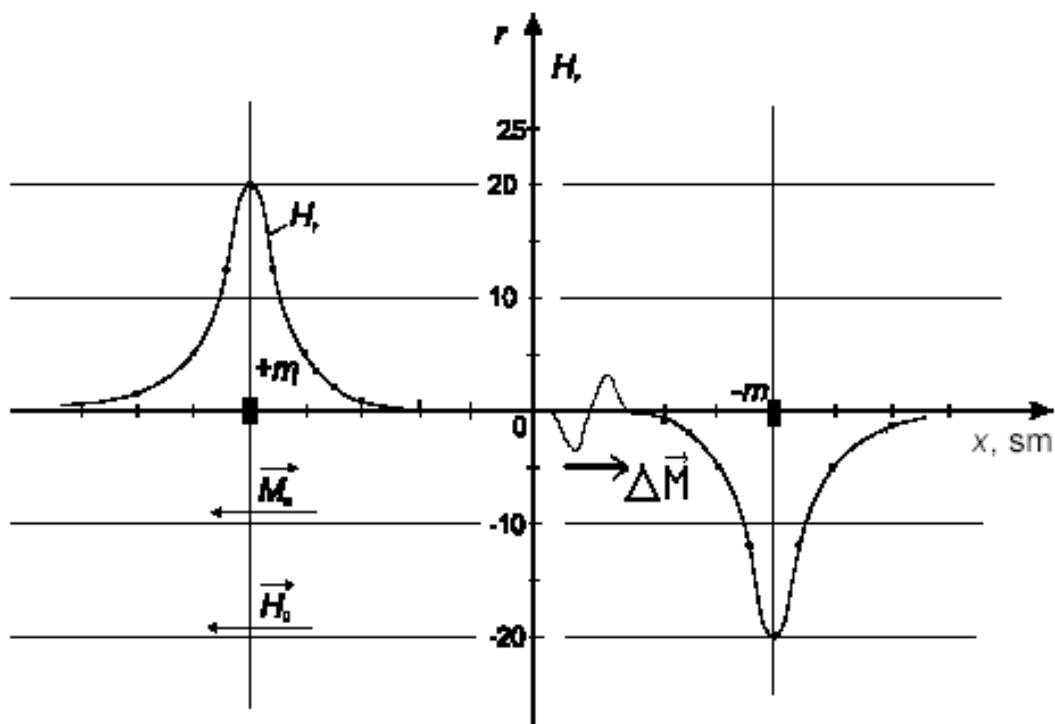


Figure 2

The x axis is taken parallel to pipe's axis and on the surface of the body. In ordinates we have the normal component of the magnetic field, as a function of position along pipe's surface and at a short and constant distance from that surface.

To obtain the field, we assume that the ferromagnetic pipe is uniformly magnetized with magnetization vector \vec{M}_0 in the external field \vec{H}_0 due to the Earth.

The magnetization vector \vec{M}_0 is everywhere parallel to pipe axis.

The small rectangles on the x axis show the beginning and the end of the pipe.

Figure 2 shows a perturbation in the normal component of the magnetic field in air, over the right side of the pipe (near the middle of the pipe).

This perturbation corresponds to a localized magnetization $\Delta\vec{M}$.

This localized magnetization produces a field that is superposed with the field produced by the magnetization of the matrix of the ferromagnetic material. If equipment like the one shown in Figure 1 is displaced along the pipe a measured magnetic field $H_r(x)$ like the pattern shown in Figure 2 could be obtained. Figure 2 shows that the field produced by the uniformly magnetized matrix of the pipe is significant only near the ends of the pipe. This is so because the field is measured very near to the surface of the matrix.

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). "The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT". In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

Therefore, near the ends of the pipe, the SMF produced by the uniformly magnetized matrix doesn't allow the measurement of the SMF produced by patterns of dislocation.

But in between the SMF of the matrix is almost zero, so that the SMF of another origin can be measured. The origin of $\Delta\vec{M}$ in the material could be as follows.

Let us suppose that a scanning searching anomalous signals of SMF is done after manufacturing the steel pipe.

Let us also suppose that during manufacturing the material of the pipe was heated above its Curie's temperature.

Then it was cooled in the weak external magnetic field of the Earth.

It gains a degree of magnetization that can be reached at normal temperature only in a high-intensity magnetic field.

Due to the so called "Para process" (Livshits and others, 1982) this magnetization is correlated with significant strains (the magnetostrictive constant of the paraprocess is much greater than the magnetostrictive constant at ambient temperature, the so called technical magnetostrictive constant). As Duvob (2004) put it: "natural magnetization at manufacturing of machine-building products forms, as a rule, exactly at such conditions. The mechanism of the product's real magnetic texture formation (fusing, forging, thermal treatment, welding) occurs directly after crystallization at cooling below the Curie point. Here the process of cooling is, as a rule, non-uniform. The metal external layers cool faster than the internal ones. Thermal stresses form across the product's volume. They form with the lattice and the appropriate magnetic texture. They appear mainly in areas of the greatest concentration of lattice defects (i.e., clusters of dislocations) and of structural non-uniformity".

The domain boundaries (DB) get attached and a strong local magnetization is produced that overcomes average matrix magnetization. The magnetic field thus produced emerges in the surface of the material and gives a strong signal of SMF when measured as explained above. The points where the SMF signal goes to zero in between two maxima of opposite sign, as shown in Figure 2, correspond to the projection onto the surface of lines of residual stress concentration.

It was established in industrial research that natural magnetization, formed in such a way, reflects the product's structural and technological heredity, and as mentioned above, the lines where the field changes its sign, correspond to the lines of concentration of residual stresses.

A brief discussion and conclusions

The magnetostrictive effect changes its sign when the external magnetic fields are strong enough. The same occurs with the converse effect that is used as a framework in MMM method. This non-linear behaviour makes the interpretation of experimental results complex. In principle it is possible to estimate stresses produced by work loads in ferromagnetic bodies used for structural purposes or as machine elements. But in this case if magneto-elastic effect is used for stress calculation, not considering the non-linearity of the relation between magnetization and stress can result in a significant underestimation of the stress.

The MMM method can be applied to scan, depending on the size, near the 100% of a piece. It can detect stress and strain concentration zones that can not be detected by other NDT methods. It can be used to follow the evolution of these zones and it can be used for predictive purposes. It can be combined with more traditional NDT methods to study more in depth the troublesome zones detected by measuring the scattering magnetic fields in the surface of materials (Suárez-Antola, Vedovatti and Zirnhelt, 2004).

Acknowledgements

The authors give warm thanks to John Zirnhelt and Eduardo Vedovatti, for several interesting discussions about the magnetic memory method.

Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, D. (2014). “The Physical Foundations of the Magnetic Memory Method of NDT”. In: Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos.

Suggested references

A. Dubov, “Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT methods”, Montreal World Conference on Non-Destructive Testing, August 2004.

A. Herpin, “Théorie du magnetisme”, Presses Universitaires de France, Paris, 1968.

F. V. Hunt, “Electroacoustics”, Harvard University Press, Cambridge, Ma, 1954.

Ch. Kittel, “Introduction to solid state physics”, Wiley, N.Y., 1990.

L. Landau and E. Lifchitz, “Électrodynamique des milieux continus”, Mir, Moscow, 1969.

B. G. Livshits, V.S. Krasheninnikov, Y.L. Linetski, “Propiedades físicas de metales y aleaciones”, Mir, Moscú, 1982.

W. P. Mason, “Physical acoustics and the properties of solids”, Van Nostrand, NY, 1958.

R. Suárez Antola, E. Vedovatti, **J. Zirnhelt** “Magnetic Memory Method, a critical review”, Montreal World Conference on Non-Destructive Testing, August 2004.

V.T. Vlasov, “Physical base of the method of metal magnetic memory – own magnetic field of dislocations” in the 3rd International Conference on Diagnostics of Equipment and Structures using the Magnetic Memory Method”, Moscow, Russia, February 2003.

S.V. Vonsovskii, “Magnetism”, Halstead Press, N.Y., 1975

Ch. Wert and R. Thomson, “Physics of solids”, McGraw-Hill, N.Y., 1970



El método de la memoria magnética de Dubov y las regiones de influencia de los defectos significativos

Roberto Suárez-Ántola

Facultad de Ingeniería y Tecnologías, Universidad Católica del Uruguay, 8 de Octubre 2738

Montevideo, CP 11600, Uruguay

Fax number (598-2) 4872842.

E-mail : rsuarez@ucu.edu.uy

Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear, Mercedes 1041

Ministerio de Industria, Energía y Minería,

Montevideo, CP11100, Uruguay

Resumen:

Cuando un cuerpo ferromagnético se enfria por debajo de su temperatura de Curie, el campo magnético terrestre genera un patrón típico de dominios en ese cuerpo. Asociados a procesos de térmicos o por deformación en frío se producen defectos en la estructura policristalina. Algunos defectos estructurales presentan concentraciones de esfuerzos y deformaciones importantes. Estas concentraciones alteran localmente los dominios magnéticos y producen, a su vez, heterogeneidades en la magnetización que pueden ser detectadas utilizando la dispersión del campo magnético en la superficie de los cuerpos. La medición de las no uniformidades de la magnetización permite detectar esos defectos en forma no destructiva. Este es el fundamento del método de la memoria magnética debido a Anatoli Dubov. Recientemente se utilizó el concepto de región de influencia de defectos significativos para relacionar las frecuencias de los modos de vibración de una estructura o máquina con la población de defectos presentes en el material. En este trabajo se discute la posibilidad de generalizar y aplicar ese concepto al estudio de algunas de las correlaciones entre las propiedades elasto-plásticas y las propiedades magnéticas que hacen posible el método de la memoria magnética. Para ello se construye un modelo matemático simple que permite relacionar las regiones de influencia de los defectos magnéticamente significativos con las no uniformidades del campo de dispersión medido. Se discuten las limitaciones que presenta el uso del concepto de región de influencia en el caso del método de la memoria magnética cuando se intenta una estimación de los esfuerzos mecánicos asociados a esos defectos significativos. Se sugiere una conexión entre los resultados obtenidos empleando una combinación del método de la memoria magnética con otros métodos de END y algunos de los parámetros de la mecánica de la fractura.

Palabras clave: **método de la memoria magnética, efecto magneto-elástico, región de influencia, defectos, desarrollo multipolar, mecánica de la fractura**

1. Introducción

La mayor parte de los procesos de deterioro y falla mecánica en estructuras o máquinas comienza en regiones donde las tensiones se encuentran concentradas y las deformaciones locales son mucho mayores que la deformación promedio.

Los esfuerzos mecánicos se concentran en torno a defectos o heterogeneidades en la estructura de los materiales, producidos durante los procesos de fabricación o como consecuencia de la aplicación de cargas de servicio.

Las piezas ferromagnéticas poseen una magnetización natural, que se altera localmente en las regiones de concentración de esfuerzos. Como consecuencia, esas regiones

pueden ser detectadas y ubicadas midiendo el campo magnético asociado a la magnetización natural y sus variaciones en la superficie de la pieza, denominado campo magnético de fuga. Entonces se puede detectar en forma no destructiva lugares donde hay o puede haber defectos relevantes. En última instancia, en esto consiste la utilidad principal del método de la memoria magnética de los metales, ideado y puesto a punto en Rusia por Anatoli Dubov (1), (2), (3). En la actualidad este método ha despertado un interés considerable en la comunidad que se ocupa de los ensayos no destructivos, así como en personas que diseñan, construyen o mantienen estructuras y máquinas con componentes ferromagnéticos.

En lo que sigue se discuten algunos aspectos del método de Dubov recurriendo al concepto de región de influencia que puede hacerse corresponder a cada defecto significativo en una pieza de máquina o elemento de una estructura. El origen del concepto de región de influencia puede rastrearse hasta el volumen de influencia de un defecto propuesto en la teoría energética de la fractura frágil. Así, la presencia de una fisura en un cuerpo sometido a cargas mecánicas, puede reducir el estado de esfuerzos en una parte del material adyacente en una cantidad que depende de la posición, el tamaño y la orientación de la fisura respecto del campo nominal de esfuerzos. Esta reducción en el estado de esfuerzos se acompaña de una reducción ΔU en la energía elástica almacenada en el cuerpo cargado. Si u representa la densidad de energía elástica que existiría en la zona donde se encuentra la fisura cuando ésta no se encuentra presente, entonces el volumen V_d de influencia del defecto se puede definir

así: $V_d = \frac{|\Delta U|}{u}$ El cálculo de $\Delta U = - \int_0^{A_d} G \cdot dA$, (donde A_d es el área de la fisura), se

puede efectuar a partir de las fórmulas de la mecánica de la fractura lineal elástica que relacionan la velocidad de liberación de energía elástica G con los módulos de elasticidad y los factores de intensidad de esfuerzos K_I, K_{II}, K_{III} . Usando las simetrías correspondientes al modelo del defecto, es posible definir una región tridimensional centrada en el mismo, la **región de influencia mecánica R_{mec}** , que puede extenderse luego a situaciones dinámicas como las que se plantean a propósito de las vibraciones mecánicas de estructuras y máquinas, introduciendo un conjunto de módulos de elasticidad equivalentes para describir la respuesta mecánica del cuerpo con defectos (4). El objetivo principal del presente trabajo es explorar la posibilidad de generalizar el concepto de región de influencia mecánica de los defectos significativos hasta abarcar los fenómenos magnéticos que en los cuerpos ferromagnéticos aparecen a menudo asociados con esos defectos. Para ello se procederá en tres etapas. En una primera etapa se considerará la perturbación magnética producida por el defecto tal como se detecta midiendo el campo de fuga en la superficie de la pieza ensayada. En una segunda etapa se estudiará el efecto magneto-elástico desde un punto de vista termodinámico. Finalmente se analizará brevemente la influencia de los defectos sobre la magnetización natural del cuerpo y su manifestación en el campo de fuga. Sobre esta base se discutirá las posibilidades que abre y las limitaciones que conlleva el intento de asociar una región de influencia a cada defecto. Asimismo se efectuarán algunos comentarios sobre la posibilidad de inferir, a partir de la aplicación del método de la memoria magnética de los metales, algunas características de los defectos que pueden resultar de interés tanto desde el punto de vista de los ensayos no destructivos como desde el punto de vista de la mecánica de la fractura.

2. Región de influencia magnética de un defecto y caracterización multipolar de una perturbación magnética localizada

Por lo menos desde 1905 se ha prestado atención, desde la perspectiva de los ensayos no destructivos, al hecho de que la magnetización local se puede ver perturbada por la presencia de inclusiones no ferromagnéticas o cavidades que poseen permeabilidades mucho menores que la del material ferromagnético adyacente, generando heterogeneidades magnéticas primarias que dispersan las líneas del flujo (5). Pero además, la imantación natural de una pieza ferromagnética se modifica con la aplicación de cargas externas y con las concentraciones de tensiones mecánicas asociadas a defectos presentes en el material (aglomeraciones de dislocaciones, micro-poros, micro-fisuras, inclusiones, cavidades, fisuras). Estas perturbaciones localizadas de la magnetización natural son una manifestación del efecto magneto-elástico. Como tales, originan heterogeneidades magnéticas secundarias de suma importancia desde el punto de vista del ensayo no destructivo mediante el método de la memoria magnética (MMM). A cada defecto significativo único o defecto equivalente obtenido por combinación de defectos próximos, se le puede asociar una región R_{mag} que puede considerarse como una **región de influencia magnética** del defecto. Comprende todos los puntos en los cuales es significativa la perturbación en la magnetización producida por el defecto en cuestión.

Esta perturbación se manifiesta en un cambio de dirección en las líneas de flujo de la inducción \vec{B} y en una variación en su magnitud. Si el defecto dispersa las líneas, algunas de ellas salen del (y entran al) cuerpo a través de la frontera más próxima, como sugiere la Figura 1. Si las concentra, se produce el efecto opuesto.

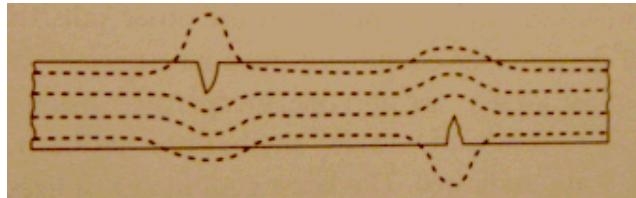


Figura 1: Fuga de líneas de flujo magnético asociada a perturbaciones en la magnetización debida a dos heterogeneidades magnéticas primarias.

Si la fuga de flujo hacia (o desde) el aire es lo bastante significativa, puede medirse el campo de fuga (auto-campo de fuga en la jerga del MMM) utilizando sensores de campo magnético situados lo bastante próximos a la frontera.

En el aire, la inducción \vec{B} y el campo magnético \vec{H} son proporcionales: $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$

Como $\nabla \bullet \vec{B} = 0$ en todas partes, si se define la magnetización \vec{M} tal que $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{M}$,

entonces $\nabla \bullet \vec{H} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \bullet \vec{M}$. Por otra parte, $\nabla \wedge \vec{H} = \vec{0}$ en ausencia de corrientes

eléctricas de conducción, por lo que se puede poner $\vec{H} = -\nabla \varphi_M$ siendo $\varphi_M(\vec{r})$ un potencial escalar magnético que verifica la ecuación de Poisson (6):

$$\nabla^2 \varphi_M(\vec{r}) = \frac{1}{\mu_0} \nabla \bullet \vec{M}(\vec{r}) \quad [1]$$

(Aquí \vec{r} representa el vector de posición respecto de un sistema de coordenadas apropiado). La solución de [1] en un punto de observación fuera de la pieza es (6):

$$\varphi_m(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iiint_C \frac{\rho_m(\vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \cdot dV' + \frac{1}{4\pi\mu_0} \iint_{\partial C} \frac{\sigma_m(\vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \cdot dS' \quad [2]$$

En [2] C representa la región ocupada por el cuerpo, y ∂C su frontera, $\rho_M = -\nabla \bullet \vec{M}$ es una densidad volumétrica de carga magnética y $\sigma_M(\vec{r}') = \vec{M}(\vec{r}') \bullet \vec{n}(\vec{r}')$ es una densidad superficial de carga, siendo $\vec{n}(\vec{r}')$ el vector unitario normal a la superficie en el punto \vec{r}' (dirigido hacia el exterior del cuerpo) y \bullet representa el producto escalar de vectores.

Si $\delta\vec{M}(\vec{r})$ es una perturbación de la imantación debida a un defecto, la perturbación $\delta\vec{H}(\vec{r}) = -\nabla \delta\varphi_M(\vec{r})$ en el auto-campo se puede hallar resolviendo la ecuación:

$$\nabla^2 \delta\varphi_M(\vec{r}) = \frac{1}{\mu_0} \nabla \bullet \delta\vec{M}(\vec{r}) \quad [3]$$

La solución de [3] se obtiene de [2] sustituyendo ρ_m por $\delta\rho_m$, σ_m por $\delta\sigma_m$, C por R_{mag} y ∂C por $\partial C \cap R_{mag}$ (que puede ser vacía si la región de influencia magnética del defecto no llega hasta la superficie de la pieza).

En el aire próximo a la superficie de la pieza, la perturbación $\delta\varphi_m$ se puede expresar siempre mediante un desarrollo multipolar respecto de un origen de coordenadas localizado en el medio del defecto, de modo que el vector de posición \vec{r} del punto donde se considera el campo posea una magnitud r mayor que la magnitud r' de cualquier vector de posición \vec{r}' correspondiente a un punto donde $\delta\vec{M}(\vec{r}') \neq \vec{0}$ (7):

$$\delta\varphi_M \approx (\delta\varphi_M)_{dipolo} + (\delta\varphi_M)_{cuadripolo} + \dots + (\delta\varphi_M)_{2^l \text{ polo}} + \dots \quad [4]$$

El desarrollo multipolar comienza en el término de dipolo, correspondiente a $l=1$, caracterizado por tres coeficientes de dipolo independientes. El término bipolar se puede representar así:

$$(\delta\varphi_M)_{dipolo} \approx \frac{1}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{\delta\vec{\mu} \bullet \vec{r}}{r^3} \quad [5]$$

En lo que sigue se supone que R_{mag} se encuentra en el interior del cuerpo. Entonces el vector $\delta\vec{\mu} = \iint_{R_{mag}} \delta\rho_M \cdot \vec{r}' \cdot dV'$ es el momento bipolar de la distribución de la perturbación

en la magnetización. El siguiente término, correspondiente a $l=2$, viene caracterizado por 5 coeficientes de cuadripolo independientes. Se puede representar así:

$$(\delta\varphi_M)_{cuadripolo} \approx \frac{1}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{\vec{r} \bullet \delta\hat{Q} \bullet \vec{r}}{r^5} \quad [6]$$

El tensor de segundo orden $\delta\hat{Q}$, simétrico y con traza nula, es el tensor de momento cuadripolar de la distribución espacial de la perturbación en la magnetización asociada al defecto. Sus componentes vienen dadas, en coordenadas cartesianas ortogonales, por

$$\delta Q_{ij} = \iint_{R_{mag}} (3 \cdot x_i \cdot x_j - r'^2 \cdot \delta_{ij}) \cdot \delta\rho_M \cdot dV' \quad (i,j=1,2,3) \quad [7]$$

(El símbolo δ_{ij} representa, como es usual, la delta de Kronecker). El término de octupolo se caracteriza mediante 7 parámetros independientes. Y así sucesivamente, para los otros términos del desarrollo multipolar del potencial magnético.

Obsérvese ahora que la determinación del auto-campo de fuga en el aire en las proximidades de la pieza, en un número lo bastante grande de puntos, permitiría una

estimación experimental de los coeficientes de dipolo, cuadripolo, etc. Como ejemplo del procedimiento a seguir, supongamos que el centro de la región de influencia magnética se encuentra en un punto de vector de posición \vec{r}_d cuyas componentes x_d, y_d, z_d son desconocidas. Si se mide el campo magnético de fuga en planos paralelos a la superficie de la pieza pero lo bastante alejados como para que el término bipolar sea dominante respecto de los demás términos de multipolo, a partir de [5] resulta:

$$\delta\vec{H}(\vec{r}) = -\nabla\delta\varphi_m \approx \delta\vec{H}(\vec{r})_{dipolar} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \cdot \left(\frac{-\delta\vec{\mu}}{\|\vec{r} - \vec{r}_d\|^3} + \frac{(\delta\vec{\mu} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_d)) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_d)}{\|\vec{r} - \vec{r}_d\|^5} \right) \quad [8]$$

A partir de las mediciones $\delta\vec{H}(\vec{r}_k)$ del campo en un conjunto lo suficientemente numeroso de puntos de vectores de posición \vec{r}_k , se pueden estimar las componentes de \vec{r}_d y del momento $\delta\vec{\mu}$ aplicando un algoritmo para el ajuste no lineal de parámetros, como el de Levenberg-Marquardt (8). La Figura 2 muestra dos esquemas posibles de variación de la componente normal del auto-campo de fuga, correspondientes a defectos que se comportan como dipolos, a medida que el sensor de componente normal se desplaza paralelamente a una frontera del cuerpo.

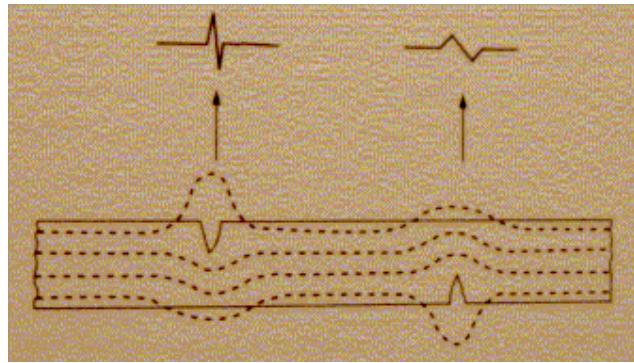


Figura 2: Señales de campo de fuga correspondientes a dipolos magnéticos

Una vez estimadas las coordenadas x_d, y_d, z_d y las tres componentes de $\delta\vec{\mu}$, acercándose a la superficie de la pieza y midiendo nuevamente el auto-campo de fuga, se pueden estimar los parámetros de cuadripolo a partir de las componentes de los vectores $\delta\vec{H}(\vec{r}_j) - \delta\vec{H}(\vec{r}_j)_{dipolar}$ determinados para un nuevo conjunto de vectores de posición \vec{r}_j , y así sucesivamente. Entonces **la perturbación en la magnetización natural producida por el defecto se podría representar mediante un conjunto de coeficientes polares que, en principio, son equivalentes**. Todo lo anterior presupone la posibilidad de diferenciar la magnetización natural de la pieza ferromagnética de las perturbaciones producidas por concentración de tensiones, inclusiones, y cavidades (2).

3. Termodinámica de la magneto-estricción y la magneto-elasticidad

Habiendo sugerido una caracterización de la perturbación magneto-estática producida por un defecto, a través de los coeficientes del desarrollo multipolar del campo de potencial asociado, la siguiente etapa del análisis se debe dirigir a estudiar la relación entre la magnetización, el tipo de defecto que la produce y el estado local de esfuerzos y

de deformaciones en el material de la pieza ferromagnética. Para ello conviene comenzar por los resultados generales que ofrece la termodinámica.

Si u es la energía interna por unidad de volumen, s es la entropía por unidad de volumen, $\hat{\sigma} : d\hat{\epsilon}$ es el trabajo mecánico por unidad de volumen ($\hat{\sigma}$ es el tensor de esfuerzos, $\hat{\epsilon}$ el tensor de deformaciones), T la temperatura absoluta, y $\vec{H} \bullet d\vec{B}$ es el trabajo magnético por unidad de volumen, entonces durante un proceso reversible la primera y la segunda ley combinadas dan (9):

$$du = T \cdot ds + \hat{\sigma} : d\hat{\epsilon} + \vec{H} \bullet d\vec{B} \quad [9]$$

(Aquí $\hat{\sigma} : d\hat{\epsilon} = \sum_{i,j=1}^3 \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij}$, mientras que $\vec{H} \bullet d\vec{B} = \sum_{k=1}^3 H_k \cdot dB_k$, y se suma sobre índices

i, j, k representando las direcciones de los ejes de coordenadas cartesianas ortogonales).

Introduciendo el potencial termodinámico g (función de Gibbs magnético-elástica) mediante la transformación de Legendre $g = u - T \cdot s - \hat{\sigma} : \hat{\epsilon} - \vec{H} \bullet \vec{B}$, resulta que

$$dg = -s \cdot dT - \sum_{i,j=1}^3 \epsilon_{ij} \cdot d\sigma_{ij} - \sum_{k=1}^3 B_k \cdot dH_k \quad [10]$$

Entonces las componentes del vector de inducción verifican: $B_k = -\left(\frac{\partial g}{\partial H_k}\right)_{T,\hat{\sigma}}$ [11]

Las componentes del tensor de deformación, por su parte, son: $\epsilon_{ij} = -\left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}\right)_{T,\vec{H}}$ [12]

De estas relaciones y de la igualdad de las derivadas cruzadas se desprende que:

$$\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial H_k}\right)_{T,\hat{\sigma}} = \left(\frac{\partial B_k}{\partial \sigma_{ij}}\right)_{T,\vec{H}} \quad [13]$$

Pero $\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial H_k}\right)_{T,\hat{\sigma}}$ es un coeficiente de **magneto-estricción** que expresa la modificación en

el estado de deformación de un cuerpo cuando el campo magnético varía, mientras

que $\left(\frac{\partial B_k}{\partial \sigma_{ij}}\right)_{T,\vec{H}} = \left(\frac{\partial M_k}{\partial \sigma_{ij}}\right)_{T,\vec{H}}$ es un coeficiente de **magneto-elasticidad** que expresa la

modificación en la magnetización de un cuerpo cuando el estado de esfuerzos mecánicos varía. (Como $B_k = \mu_0 \cdot H_k + M_k$, si el campo magnético \vec{H} permanece constante, la variación de B_k es igual a la variación de la magnetización M_k).

Los coeficientes son, pues, iguales. Si hay un efecto de magneto-estricción no nulo, entonces hay un efecto magneto-elástico no nulo, del mismo signo y de igual cuantía:

$$\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial H_k}\right)_{T,\hat{\sigma}} = \left(\frac{\partial M_k}{\partial \sigma_{ij}}\right)_{T,\vec{H}} \quad [14]$$

Los materiales que presentan efectos magneto-elásticos se comportan como si tuvieran un centro de simetría. Por este motivo los potenciales termodinámicos son funciones pares de las componentes del campo magnético. Así la función de Gibbs elástica $g_e = u - T \cdot s - \hat{\sigma} : \hat{\epsilon}$, despreciando los términos que describen el efecto de una variación en la temperatura, se puede representar aproximadamente por (9):

$$g_e = -\frac{1}{2} \left(c_{ijkl}^B + R_{ijklmn} \cdot B_m \cdot B_n \right) \sigma_{ij} \sigma_{kl} - \frac{1}{2} q_{ijmn} \cdot B_m \cdot B_n \cdot \sigma_{ij} + \frac{1}{2} \beta_{mn} \cdot B_m \cdot B_n + \frac{1}{4!} K_{mnop} \cdot B_m \cdot B_n \cdot B_o \cdot B_p + \frac{1}{6!} K_{mnopst} \cdot B_m \cdot B_n \cdot B_o \cdot B_p \cdot B_s \cdot B_t \quad [15]$$

En esta fórmula se ha utilizado la convención de Einstein, de acuerdo con la cual se suma, en este caso entre 1 y 3, sobre los índices que aparecen repetidos. c_{ijkl}^B son las complacencias elásticas cuando el campo $\vec{B} = \vec{0}$, q_{ijmn} son parámetros de magneto-elasticidad, R_{ijklmn} son los denominados coeficientes de corrección mórfica de las complacencias elásticas (que tienen en cuenta el efecto del campo \vec{B} sobre los módulos de elasticidad, (9)), y β_{mn} , K_{mnop} y K_{mnopst} son parámetros de **“impermeabilidad magnética”** que describen la relación entre \vec{H} y \vec{B} cuando los esfuerzos mecánicos son nulos y por ende no hay efecto magneto-elástico. En efecto, puesto que ahora $dg_e = -s \cdot dT - \hat{\epsilon} : d\hat{\sigma} + \vec{H} \bullet d\vec{B}$, se tiene:

$$H_m = \left(\frac{\partial g_e}{\partial B_n} \right)_{T, \hat{\sigma}} = (\beta_{mn} - q_{ijmn} \cdot \sigma_{ij} - R_{ijklmn} \cdot \sigma_{ij} \cdot \sigma_{kl}) \cdot B_n + \frac{1}{6} K_{mnop} \cdot B_n \cdot B_o \cdot B_p + \frac{1}{90} K_{mnopst} \cdot B_n \cdot B_o \cdot B_p \cdot B_s \cdot B_t \quad [16]$$

Obsérvese que, despreciando las correcciones mórficas, en una la aproximación lineal a la relación entre \vec{H} y \vec{B} se tiene: $H_m = (\beta_{mn} - q_{ijmn} \cdot \sigma_{ij}) \cdot B_n$ [17]

Entonces las impermeabilidades locales cuando los esfuerzos son nulos β_{mn} , se ven alteradas por el estado local de esfuerzos, aumentando o disminuyendo según el signo y la magnitud de los términos $q_{ijmn} \cdot \sigma_{ij}$. Parecería entonces que si las impermeabilidades aparentes $\beta_{mn} - q_{ijmn} \cdot \sigma_{ij}$ aumentan lo suficiente, debido a una concentración local de esfuerzos provocada por un defecto, **desde el punto de vista magnético la situación puede ser equivalente a la generada por una inclusión no magnética o un vacío, sin venir acompañados por una concentración de esfuerzos significativa.**

Para los materiales policristalinos, con granos orientados al azar, se puede asumir isotropía cuando no se encuentran magnetizados en una dirección dominante, y simetría isótropa transversa (todas las direcciones perpendiculares a un eje son equivalentes) cuando están magnetizados en una dirección dada, por lo cual la expresión del potencial g_e y las fórmulas deducidas a partir de él se simplifican considerablemente.

El modelo más simple, pero todavía adecuado para una discusión cualitativa, es el unidimensional. En este caso $g_e = u - T \cdot s - \sigma \cdot \epsilon$ se reduce a:

$$g_e = -\frac{1}{2} (c^B + R \cdot B^2) \cdot \sigma^2 - \frac{1}{2} q \cdot B^2 \cdot \sigma + \frac{1}{2} \beta \cdot B^2 + \frac{K_0}{24} \cdot B^4 + \frac{K_1}{720} \cdot B^6 \quad [18]$$

Entonces la deformación $\epsilon = -\left(\frac{\partial g_e}{\partial \sigma} \right)_{T, B} = (c^B + R \cdot B^2) \cdot \sigma + q \cdot B^2$ es la suma de una

componente elástica (con corrección mórfica) proporcional a la tensión σ y una componente magneto-estrictiva proporcional a B^2 .

El campo magnético viene dado por:

$$H = \left(\frac{\partial g_e}{\partial B} \right)_{T,\sigma} = (\beta - q \cdot \sigma - R \cdot \sigma^2) \cdot B + \frac{K_0}{12} \cdot B^3 + \frac{K_1}{90} \cdot B^5 \quad [19]$$

La permeabilidad magnética aparente es:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{B}{H} = \frac{1}{(\beta - q\sigma - R\sigma^2) + \frac{K_0}{12} B^2 + \frac{K_1}{90} B^4} \quad [20]$$

Despreciando el efecto mórfico, de [20] se desprende que cuando $q > 0$ (caso del hierro en campos magnéticos débiles, (10)) la permeabilidad relativa μ_r disminuye (aumenta) respecto de su valor en ausencia de esfuerzos, cuando la tensión σ es de compresión (es de tracción). Lo opuesto ocurre si $q < 0$ (caso del níquel, (10)).

4. Magnetización, defectos estructurales y campo propio de fuga

El análisis termodinámico convencional, como el realizado aquí, no permite abordar el problema de la historia mecánica, térmica y magnética del metal, problema que es central en el método de la memoria magnética. Tampoco permite abordar la cuestión que plantea la introducción de dos regiones de influencia, una mecánica R_{mec} y otra magnética R_{mag} , asignadas al mismo defecto: si son iguales, o si no lo son, cuál es la relación entre ellas. Para discutir estos problemas es conveniente analizar brevemente la estructura de dominios de los cuerpos ferromagnéticos, así como el tipo y la distribución de defectos estructurales en los cuerpos policristalinos utilizados como piezas de máquinas y elementos estructurales. Las tensiones internas y los límites de los granos se pueden reducir, en última instancia, a propiedades de los defectos estructurales.

Considérese un material calentado por encima de su temperatura de Curie, como ocurre durante algunos procesos de soldadura o de tratamiento térmico, que luego se enfriá por debajo de la misma en presencia del campo magnético terrestre (del orden de los 0.3 gauss). En el entorno de la temperatura de Curie el cuerpo pasa del estado paramagnético al estado ferromagnético con un cambio de volumen relacionado con el establecimiento de las interacciones de intercambio. Este fenómeno se denomina magneto-estricción del para-proceso y es numéricamente mucho mayor que el cambio de volumen del cuerpo imantado a temperaturas bien por debajo de la de Curie (magneto-estricción técnica). De acuerdo con las relaciones [14], lo mismo acontece con el efecto magneto-elástico en uno y otro caso, tanto para el asociado con las tensiones debidas a las cargas externas como al asociado con las tensiones internas. El efecto del campo magnético terrestre, que no es significativo en las condiciones de la imantación técnica, es considerable en las condiciones del para-proceso. La influencia del campo terrestre se combina con los elementos propios de la aleación que van a originar la textura cristalina y con los defectos estructurales que nacen durante el para-proceso, determinando la estructura de dominios y los detalles de la magnetización natural. Una vez enfriado el material en el campo terrestre, si no se aplican campos artificiales intensos, la estructura de dominios magnéticos queda (por lo menos en parte) congelada. Consideradas como sistemas mecánicos, las paredes de los dominios se mueven en un campo de energía potencial que presenta numerosos mínimos separados por barreras. Estas barreras se producen debido a concentraciones de tensiones (aglomeración de dislocaciones) y a las inclusiones de material no magnético. Si se aplica un campo magnético externo pequeño, el desplazamiento de la pared es

proporcional al campo, y cuando este cesa, vuelve a su posición de equilibrio en uno de los mínimos del potencial. De ahí la estabilidad de la estructura de dominios del cuerpo ferromagnético, a temperaturas bien por debajo de la de Curie, en presencia de campos débiles como el de la Tierra. Las perturbaciones en la magnetización natural adquirida durante el para-proceso, por efecto magneto-elástico (heterogeneidad magnética secundaria), indican la presencia de regiones de concentración de tensiones (1). Los procesos de deformación en frío aumentan la densidad y provocan la aglomeración de las dislocaciones, con la consiguiente concentración de tensiones internas, lo que se asocia con perturbaciones (mensurables a través del campo de fuga) en la magnetización del cuerpo (11). Entonces se produce una modificación de la energía elástica que se extiende por la misma región donde se produce la perturbación magnética, de modo que en este caso $R_{mec} \approx R_{mag}$. Por otra parte, las inclusiones, las fisuras y las cavidades producen modificaciones en el estado de tensiones en puntos próximos (no necesariamente tensiones internas), lo cual también se traduce en una variación de la energía elástica del cuerpo y en la posibilidad de definir una región de influencia mecánica del defecto como se describió en la introducción. La modificación en el estado de tensiones (concentración o liberación) en la región de influencia mecánica produce una cierta magnetización asociada en la misma región espacial, por lo cual, si no se tiene en cuenta la desviación de las líneas del flujo por las diferencias en la permeabilidad magnética, en este caso R_{mec} y R_{mag} deberían coincidir.

La caracterización multipolar de la perturbación magnética asociada a un defecto significativo ubica los multipolos en un mismo punto: el centro de R_{mag} , de coordenadas x_d, y_d, z_d . Cabe preguntarse entonces si es posible reconstruir la distribución espacial $\delta\vec{M}(\vec{r}')$ de la perturbación, y por tanto si es posible reconstruir R_{mag} como conjunto de puntos en los cuales $\delta\vec{M}(\vec{r}') \neq \vec{0}$, a partir del conocimiento de los parámetros de los multipolos. A partir de mediciones sobre el auto-campo de fuga, sin información adicional, esto no parece posible. Pero si se construyen modelos magnéticos de defectos o clases de defectos específicos que involucren parámetros característicos de intensidad y extensión que puedan ser estimados a partir de mediciones, combinando el MMM con otros métodos de ensayo no destructivo (para poder obtener más información sobre el defecto, como orientación y dimensiones) entonces se podría pasar de los multipolos a una estimación de $\delta\vec{M}(\vec{r}')$. Luego, a partir de las relaciones que el efecto magneto-elástico permite establecer entre magnetización y tensiones mecánicas, se podría pasar de la estimación de $\delta\vec{M}(\vec{r}')$ a la estimación de la perturbación en el estado de esfuerzos $\delta\hat{\sigma}(\vec{r}')$. Una vez estimado el estado de esfuerzos en el defecto y sus adyacencias, se puede pasar a las consideraciones de mecánica de la fractura.

5. Conclusiones:

(1)Puesto que la perturbación magnética producida por los defectos de los materiales en la magnetización natural de un cuerpo ferromagnético, está estrictamente localizada, parece razonable introducir el concepto de región de influencia magnética R_{mag} de un defecto o de un conjunto de defectos lo bastante próximos como para aparecer como uno solo desde el punto de vista magneto-estático.

(2) Desde el punto de vista magnético y apuntando a la interpretación de los resultados de las mediciones del campo de fuga en los ensayos no destructivos, la perturbación asociada a un defecto se puede describir por medio de un desarrollo multipolar del potencial magnético, considerado en puntos en el aire que rodea a la pieza ensayada.

(3) En la práctica los coeficientes 2^l polares de órdenes elevados no pueden estimarse con suficiente precisión midiendo solamente el auto-campo de fuga, por lo cual es necesario efectuar un corte para algún orden en el desarrollo. En cualquier caso, la representación multipolar comprende siempre el término de dipolo, involucrando seis parámetros a estimar (las tres componentes del momento bipolar y las tres coordenadas de posición del centro de la región de influencia magnética). Se debe tener presente que una misma caracterización multipolar truncada corresponde a toda una familia de perturbaciones magnéticas en principio diferentes pero que generan los mismos coeficientes polares de orden bajo, inferior al orden de corte.

(4) El análisis termodinámico efectuado a partir del potencial de Gibbs magnético-elástico y sus variantes, permitió relacionar en forma completamente general los efectos magneto-estritivo y magneto-elástico y estimar la influencia del estado local de tensiones mecánicas sobre la permeabilidad magnética local del material. Una consecuencia inmediata es que una heterogeneidad magnética primaria (cavidad o inclusión no ferromagnética) podría comportarse en forma no distingible de una heterogeneidad magnética secundaria (concentración de tensiones) cuando la única información disponible proviene de la medición del auto-campo de fuga en el aire próximo a la superficie de la pieza.

(5) Por tanto la relación entre un defecto y el correspondiente desarrollo multipolar del potencial no es biunívoca. No obstante, si se dispone de información adicional sobre el material y sobre la historia mecánica, térmica y magnética del cuerpo, cabe esperar que, al menos en algunos casos, se pueda inferir el tipo de defecto, estimar su orientación y otras propiedades de interés. La posición del defecto se puede estimar siempre a través de las coordenadas x_d, y_d, z_d del centro de la región de influencia magnética.

(6) Para heterogeneidades magnéticas secundarias las regiones de influencia mecánica y magnética parecen coincidir. Para heterogeneidades magnéticas primarias coinciden si solo se considera la perturbación magnética causada por efecto magneto-elástico (o sea el aspecto de heterogeneidad secundaria que toda heterogeneidad primaria puede conllevar).

(7) La experiencia del ensayo no destructivo por medición del campo propio de fuga en equipos de plantas de potencia (superficies de transferencia de calor en calderas, curvas y uniones soldadas en tuberías de vapor, álabes de turbinas y otras piezas críticas, sugiere que el MMM no solamente permite identificar zonas de concentración de tensiones, sino que en algunos casos permite cuantificarlas (12).

(8) Estudios muy recientes realizados por Dubov y colaboradores (13) sobre planchuelas de acero sometidas a ensayos de carga estáticos y cíclicos, sugieren que es posible vincular las mediciones del campo propio de fuga con los parámetros del proceso de fractura.

(9) Si bien los resultados del MMM son remarcables y sin equivalente alguno en otros métodos de ensayo no destructivo, al parecer se requiere mucha investigación adicional para poder comprender el alcance real y las limitaciones del método.

Agradecimientos: Al Profesor Anatoli Dubov por el trabajo que aparece citado en la ref. (12) y al Dr. Eugenio Gorokhov por el trabajo que aparece citado en la ref. (13) y por la traducción al español del mismo.

Referencias

- (1) A.Dubov, “Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT methods”, en la “Montreal World Conference on Non-Destructive Testing”, Montreal, Canada, Agosto de 2004.
- (2) R. Suárez- Ántola y D. Suárez- Bagnasco, “The Physical Foundations of Magnetic Memory Method for NDT”, en las “Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos”, Montevideo Uruguay, Septiembre de 2004. (Disponible a través de biblioteca@dinamige.miem.gub.uy).
- (3) Russian Welding Society Standard RWS ST 000-04: “Inspection of Welded Joints by the Method of Metal Magnetic Memory”, Moscú, 2002
- (4) R. Suárez- Ántola, “The Region of Influence of Significant Defects and the Mechanical Vibrations of Linear Elastic Solids”, Proceedings of the XI DINAME (Ed. D. A. Rade and V. Steffen Jr), Febrero- Marzo de 2005- Ouro Preto – MG – Brazil.
- (5) K.Lauer, “Magnetic/Electrical Methods”, Capítulo 10 en V.Malhotra y N.Carino, Eds., “Handbook on Non Destructive Testing of Concrete”, CRC, Boca Raton, USA, 2004.
- (6) J.D.Jackson, “Classical Electrodynamics”, Capítulo 5 (Magnetoestática), Wiley, N.Y., USA, 1975.
- (7) J.D.Jackson, “Classical Electrodynamics”, Capítulo 4 (Multipolos y Electroestática), Wiley, N.Y., USA, 1975.
- (8) N.Gershenfeld, “The Nature of Mathematical Modeling”, Capítulo 10 (Ajuste de funciones), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.
- (9) W.P.Mason, “Physical Acoustics and the Properties of Solids”, Apéndice A.2 (Deducción de las ecuaciones para los transductores magneto-estriktivos, electroestriktivos y piezoelectrónicos), Van Nostrand, N.J., USA, 1958.
- (10) B. G. Livshits, V.S. Kraposhin, Y.L. Linetski, “Propiedades físicas de metales y aleaciones”, Capítulo 2 (Propiedades Magnéticas), Mir, Moscú, URSS, 1982
- (11) V.T. Vlasov, “Physical basis of the method of metal magnetic memory – own magnetic field of dislocations” en la “3rd International Conference on Diagnostics of Equipment and Structures using the Magnetic Memory Method”, Moscú, Rusia, February 2003
- (12) A.Dubov y A.Radziszewski, “The Experience of the Metal Magnetic Memory Method Application in Power Engineering of Russia and Poland”, en la “IV International Scientific and Technical Conference about Diagnostics of Equipment and Structures Using the Metal Magnetic Memory Method”, Moscú, Rusia, Febrero de 2007.
- (13) A.Dubov y A. Denisov, “Comportamiento del campo magnético propio en las planchuelas de acero sometidas a cargas cíclicas y estáticas”, en la “IV International Scientific and Technical Conference about Diagnostics of Equipment and Structures Using the Metal Magnetic Memory Method”, Moscú, Rusia, Febrero de 2007. (Original en Ruso).

El método de ensayo no destructivo basado en la memoria magnética de los metales y sus fundamentos físicos.

Roberto Suárez Ántola

Profesor de Ingeniería y Matemática Aplicada en la Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Universidad Católica del Uruguay
Físico Asesor en el Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay

Resumen:

Se describe un método magnético de ensayo no destructivo que comenzó a desarrollarse a partir de 1990 en Rusia, pero que solo recientemente se ha comenzado a aplicar en la Unión Europea, USA, Japón, China y otros lugares. El método se basa en el análisis de la distribución de los campos magnéticos de fuga que resultan de perturbaciones en la magnetización natural asociadas a deformaciones y cambios estructurales locales producidos durante la fabricación y uso de cuerpos ferromagnéticos. Se consideran algunas de sus aplicaciones. Se revisan los fundamentos físicos de este método magnético. Se introducen los conceptos de regiones de influencia mecánica y magnética, y se indica un problema de investigación abierto, cuya solución puede tener interés práctico, que las involucra. Se discuten las limitaciones del método, así como la posibilidad de su aplicación combinada con otros métodos de ensayo no destructivo.

Palabras clave: **Método de la memoria magnética de los metales. Efecto magnetoelástico. Efecto magneto-plástico. Regiones de influencia magnética y mecánica de un defecto. Campo magnético de fuga. Magnetización natural. Estados de tensión y deformación.**

Abstract:

A non-destructive testing method, initially developed in Russia, but that only recently has been applied in the European Union, USA, Japan, China, and in other places, is described. The method is based on the analysis of the distribution of scattering magnetic fields which result from perturbations of natural magnetization due to local strains and structural changes produced during fabrication and use of ferromagnetic bodies. Some applications are considered. The physical foundations of the method are reviewed. The concepts of magnetic and mechanical regions of influence of defects are introduced. An open research problem whose solution could have practical interest is outlined. The limitations of the method are discussed, as well as the possibility of its joint application with other nondestructive testing methods.

Key words: **metal magnetic memory method, magnetoplastic effect, magnetoelastic effect, magnetic and mechanical regions of influence of a defect, scattering magnetic field, natural magnetization, stress and strain states.**

(1) Introducción

Desde mediados de la década de 1990, en Rusia y en algunos de los países de Europa Oriental, se comenzó a aplicar un nuevo método magnético de ensayo no destructivo. A fines de esa misma década dicho método comenzó a ser aplicado, también en forma rutinaria, en China.

A diferencia de los demás métodos magnéticos utilizados para ensayos no destructivos, no requiere introducir un campo magnético artificial, externo. Se basa en las perturbaciones que los defectos provocan en la **magnetización natural** debida al campo magnético de la tierra, presente en los materiales ferromagnéticos de soldaduras, tuberías, recipientes de presión, carcásas de máquinas y rotores [1], [2].

En 1994 Anatoli Dubov propuso el nombre de **método de la memoria magnética de los metales** (abreviado como método MMM). En 1995, la Federación Rusa concedió a Dubov la primera patente de invención relacionada con el método MMM. Se lo conoce también como método de Dubov, como reconocimiento a la persona que creó el método y lo puso a punto en Rusia, partiendo de su experiencia en la investigación de fenómenos magnéticos en minas, submarinos y navíos de superficie para la fuerza naval de la antigua URSS.

En la actualidad este método ha despertado un interés considerable en la comunidad que se ocupa de los ensayos no destructivos, así como en personas que diseñan, construyen o mantienen estructuras y máquinas con componentes ferromagnéticos¹.

Al principio se aplicó al ensayo de componentes de centrales térmicas, pero poco después se lo adaptó para explorar gasoductos, oleoductos y otras tuberías, así como vías de ferrocarril (incluyendo un escaneo a tiempo real de las vías del tren subterráneo de Moscú) [2].

El objetivo de este artículo es triple: (a) presentar una versión resumida del método MMM junto con ejemplos de sus aplicaciones a la inspección de tuberías, (b) aportar algunos elementos al análisis de los fundamentos del método con el propósito de ayudar en la interpretación de los resultados de

¹ A partir de 2001 se comenzó a manifestar un interés considerable por el MMM en los países de Europa Occidental, USA y Canadá. El autor del presente artículo tuvo la oportunidad de tomar conocimiento del método en 2003, y ponerse en contacto con el Profesor Dubov, gracias a John Zirnhelt, un conocido experto en ensayos no destructivos de metales de la empresa canadiense CANSPEC.

los trabajos de laboratorio y de campo, y (c) discutir algunas de las limitaciones del MMM y las ventajas de su empleo en combinación con otros métodos de ensayo no destructivo.

(2) Concentración de tensiones y perturbaciones en la magnetización natural de cuerpos ferromagnéticos.

La evidencia experimental muestra que la mayor parte de los procesos de deterioro y falla mecánica en estructuras o máquinas comienzan en regiones donde las tensiones se encuentran concentradas y las deformaciones locales son mucho mayores que la deformación promedio. Es sabido que los esfuerzos mecánicos se concentran en torno a defectos o heterogeneidades en la estructura de los materiales, producidos durante los procesos de fabricación o como consecuencia de la aplicación de cargas de servicio.

Estos esfuerzos mecánicos que se concentran en torno a defectos o heterogeneidades pueden ser esfuerzos debidos a cargas externas, pero también puede tratarse de esfuerzos internos, esfuerzos residuales que permanecen aún cuando el cuerpo se encuentra libre de cargas externas.

Estos esfuerzos residuales aparecen asociados con aglomeraciones de líneas de dislocación en los metales policristalinos, y pueden tomar magnitudes significativas aún cuando, en el lugar en el que esos esfuerzos se encuentran, no se puedan hallar defectos macroscópicos del tipo que es identificado por los métodos de ensayo no destructivo usuales (radiografía, gammagrafía, ultrasonidos, corrientes inducidas, líquidos penetrantes, etc.). No obstante, es probable que bajo las cargas de servicio y bajo la acción del ambiente fisicoquímico (procesos de corrosión simple y corrosión bajo tensiones mecánicas), en estas regiones de concentración de esfuerzos los defectos microscópicos evolucionen incrementando su tamaño hasta transformarse en defectos mesoscópicos primero, y posteriormente en defectos macroscópicos relevantes.

Por tanto, un método no destructivo que permita detectar las regiones de concentración de esfuerzos **antes** de que surjan defectos macroscópicos relevantes, posee interés práctico. Esto es lo que ocurre con el método de la memoria magnética de los metales, y es una de las razones de su importancia como método de ensayo no destructivo de partes ferromagnéticas de estructuras, equipos y máquinas.

Las piezas ferromagnéticas poseen una magnetización natural, que se altera localmente en las regiones de concentración de esfuerzos o en presencia de heterogeneidades como inclusiones no ferromagnéticas, cavidades o fisuras. Por lo menos desde 1905 se ha prestado atención, desde la perspectiva de los ensayos no destructivos, al hecho de que la magnetización local se puede ver perturbada por la presencia de inclusiones no ferromagnéticas o cavidades que poseen permeabilidades mucho menores que la del material ferromagnético adyacente, generando heterogeneidades magnéticas que dispersan las líneas del flujo.

Pero además de estos fenómenos asociados a cavidades o inclusiones, la imantación natural de una pieza ferromagnética se modifica con la aplicación de cargas externas y con las concentraciones de tensiones mecánicas asociadas a defectos presentes en el material (aglomeraciones de dislocaciones, micro-poros, micro-fisuras, inclusiones, cavidades, fisuras). Estas perturbaciones localizadas de la magnetización natural son una manifestación de los **efectos magneto-elástico y magneto-plástico**². Como tales, originan heterogeneidades magnéticas de suma importancia desde el punto de vista del ensayo no destructivo mediante el método de la memoria magnética de los metales (método MMM) [1], [2], [8].

Estas heterogeneidades no habían sido tenidas debidamente en cuenta como posibilidades para ensayos no destructivos hasta la aparición del método MMM.

Si bien algunas de sus numerosas aplicaciones (por ejemplo, el ensayo de soldaduras) ya se encuentran contempladas en recomendaciones o en

² Estos efectos serán considerados, en el marco del análisis de los fundamentos del método de la memoria magnética, en la sección (5) del presente trabajo.

normas ISO³, el estudio de los fundamentos del método permite identificar varios problemas todavía abiertos⁴.

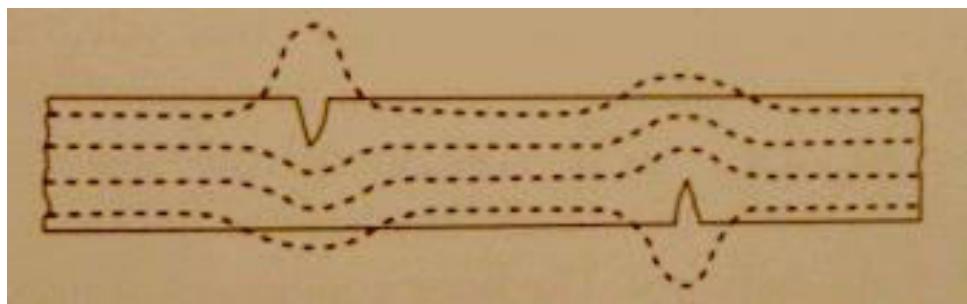
(3) La medición de las variaciones en el campo de fuga o campo propio de fuga.

Como se dijo en la sección (2) precedente, las hendiduras, cavidades, inclusiones o zonas de concentración de tensiones en un cuerpo ferromagnético perturban la magnetización natural.

Como se propuso y fundamentó en [7] se puede definir una **región de influencia magnética** comprendiendo todos los puntos del material en los cuales es significativa la perturbación en la magnetización producida por el defecto en cuestión.

Esta perturbación se manifiesta en un cambio de dirección en las líneas de flujo de la inducción magnética \vec{B} y en una variación en su magnitud.

Si el defecto dispersa las líneas, algunas de ellas salen del (y entran al) cuerpo a través de la frontera más próxima, como sugiere la Figura 1.



³ ISO-24497-1:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory - **Part 1:** Vocabulary.

ISO-24497-2:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory - **Part 2:** General requirements.

ISO-24497-3:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory - **Part 3:** Inspection of welded joints.

⁴ En febrero de 2011 se llevó a cabo en Moscú la 5th International Conference on Diagnostics of Equipment and Structures using the Magnetic Memory Method, donde entre otras cosas se presentaron los resultados de las últimas investigaciones abordando el problema desde la perspectiva de la mecánica cuántica (ver www.mmmsystems.com).

Figura 1: Fuga de líneas de flujo magnético asociada a perturbaciones en la magnetización de una pieza debida a dos heterogeneidades magnéticas primarias (en este caso dos hendiduras en el material situadas en caras opuestas).

Si el defecto concentra las líneas del campo, se produce el efecto opuesto. En el aire el campo de inducción y el campo magnético son proporcionales: $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ En el interior del material ferro-magnético $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{M}$, siendo \vec{M} la magnetización correspondiente [3], [4], [5].

Si la fuga de flujo hacia (o desde) el aire es lo bastante significativa, puede medirse el campo de fuga utilizando sensores de campo magnético situados en el aire, lo bastante próximos a la frontera, y lo bastante sensibles. En las aplicaciones del método de la memoria magnética de los metales se utiliza un tipo de magnetómetro vectorial conocido como magnetómetro de compuerta de flujo. Este tipo de magnetómetro permite determinar la componente del campo magnético en una dirección particular dada por la orientación del dispositivo en el espacio. Una combinación de tres magnetómetros adecuadamente orientados (por ejemplo ortogonalmente entre sí) permite determinar el vector del campo en cada punto. Su configuración se describe más adelante, en la nota 5.

La Figura 2 muestra dos esquemas posibles de variación de la componente normal del campo de fuga, correspondientes a defectos que se comportan como dipolos, a medida que el sensor de componente normal se desplaza paralelamente a una frontera del cuerpo.

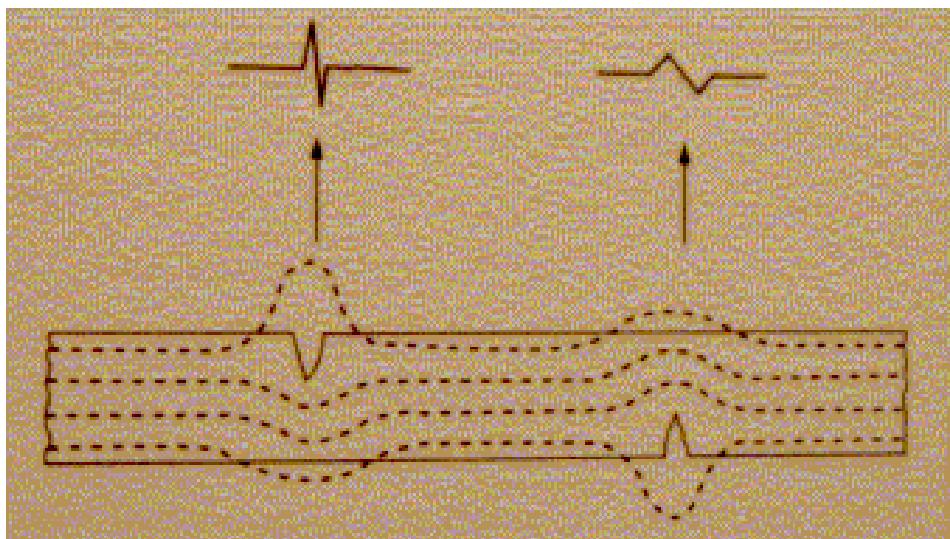


Figura 2: Señales de campo de fuga correspondientes a dipolos magnéticos. Los dipolos son equivalentes a los defectos desde el punto de vista de las mediciones del campo magnético en el aire.

Si en lugar de fisuras anchas o regiones donde falta el material, como las que muestran las figuras 1 y 2, se tiene una inclusión no ferro-magnética o una región de concentración de tensiones mecánicas como la mencionada, desde el punto de vista de las mediciones del campo de fuga también se comportan como una distribución localizada de polos magnéticos.

La Figura 3 presenta un esquema de la componente normal del campo magnético para un tubo de acero que se ha magnetizado en forma natural debido al campo magnético de la Tierra y que presenta un defecto significativo [6]. Desde el punto de vista magnético el defecto se ha representado mediante un pequeño momento dipolar $\Delta\vec{M}$ que se superpone a la magnetización natural (que se asume uniforme) \vec{M}_0 del tubo. El eje x se tomó paralelo al eje del tubo y sobre la superficie del cuerpo. El eje de ordenadas se representa la componente normal del campo magnético en función de la posición, calculada utilizando un modelo de tubería uniformemente magnetizada en el campo local de la Tierra, \vec{H}_0 , en

el aire y a una corta distancia de la superficie. Los pequeños rectángulos que se ven sobre el eje x indican los extremos del tubo.

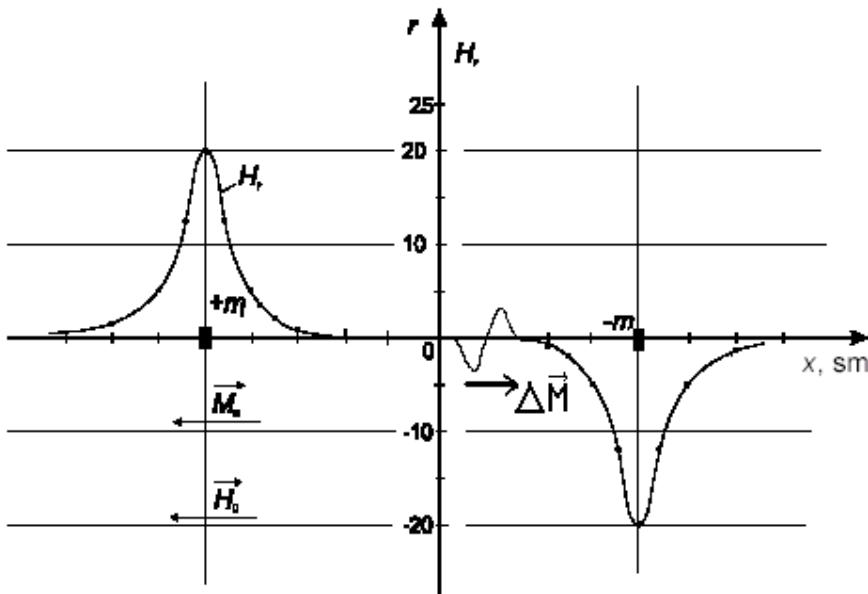


Figura 3: Esquema de la componente normal del campo magnético para un tubo de acero magnetizado en forma natural. Próximo a la mitad del tubo éste presenta un defecto que se ha idealizado como un pequeño dipolo magnético de magnitud $\Delta\vec{M}$ superpuesto al patrón de magnetización global del caño.

Cuando el campo se mide muy cerca de la superficie, la magnetización natural de la matriz del material ferro-magnético produce una componente de campo magnético significativa solo cerca de los extremos del tubo. Como consecuencia el campo magnético de fuga asociado a la matriz magnetizada puede impedir la detección del campo magnético de fuga debido a un defecto cuando éste se encuentra en o próximo a los extremos del caño.

En general las regiones con heterogeneidades magnéticas en los materiales producen patrones característicos de variación del campo magnético en el aire adyacente a la superficie del cuerpo. Por este motivo, excepto en casos en los que las zonas de concentración de tensiones se encuentran en posiciones desfavorables, **esas regiones pueden ser detectadas y ubicadas** midiendo el campo magnético asociado a la magnetización

natural y sus variaciones en la superficie de la pieza, denominado campo magnético de fuga. En particular, los lugares delimitados por curvas donde se anula la componente del campo de fuga normal a la superficie de la pieza ensayada, generalmente corresponden a defectos o concentraciones de esfuerzos mecánicos residuales significativos. Efectivamente, por una parte la componente tangencial del campo magnético es continua en la interfase entre el material y el aire, mientras que la componente normal del campo de inducción magnética es continua en dicha interfase. De estas condiciones en la frontera impuestas a los campos y de la gran diferencia de permeabilidad magnética entre el aire y los materiales ferro-magnéticos se sigue que el campo magnético en el aire está orientado casi siempre de tal forma que su componente perpendicular a la frontera es mucho mayor que su componente paralela a la misma frontera [4], [6].

Por otra parte, debido a que el campo de inducción magnética no presenta fuentes ni sumideros, si en una dirección sufre una variación significativa, debe sufrir una variación compensadora de signo opuesto y en dirección transversal a la primera [6]. Entonces, si la magnitud de la componente del campo de inducción en el material ferro-magnético paralela a la frontera disminuye al desplazarnos en la dirección de esa componente, se genera un aumento en la magnitud de la componente perpendicular a la frontera aire-sólido y se produce un incremento en la fuga del campo desde la pieza ensayada.

Como consecuencia de esta modificación en el campo de fuga, es posible detectar en forma no destructiva lugares donde hay o puede haber defectos relevantes, o donde pueden aparecer defectos relevantes con el paso del tiempo, en condiciones de servicio.

Además, en condiciones favorables se pueden detectar defectos o regiones de concentración de esfuerzos de dimensiones del orden de micro-metros [1], [2], [3].

En última instancia, en esto consiste la utilidad principal del método de la memoria magnética de los metales.

Para registrar áreas de fuga de campo, incluso de dimensiones micrométricas se desarrollaron equipos especiales, que además de versiones avanzadas de magnetómetros de compuerta de flujo, muy

sensibles⁵, incluyen dispositivos precisos para medir longitudes, conversores A/D, procesadores y otros dispositivos.

Estos dispositivos de escaneo magnético no habían sido utilizados previamente para ensayos no destructivos antes del nacimiento del MMM. Las características magnéticas que se obtienen se correlacionan bien con las regiones donde se concentran los esfuerzos mecánicos.

La Figura 4 muestra un equipo para la medición del campo de fuga: un ejemplo de dispositivo aplicable a la detección de regiones de concentración de esfuerzos en soldaduras.

⁵ Los sensores de estado sólido que se basan en el efecto Hall no resultan adecuados para su aplicación al MMM, pese a su simplicidad y a su capacidad para determinar la polaridad del campo magnético. Además de que el voltaje de salida de estos sensores depende de la velocidad de barrido, con las complicaciones que ésto conlleva en los trabajos fuera del laboratorio, no permiten una reconstrucción del vector campo magnético suficiente para los fines del ensayo no destructivo utilizando la memoria magnética de los metales.

Los magnetómetros de compuerta de flujo, inventados por Victor Vacquier en la década de 1930, fueron utilizados durante la segunda guerra mundial en la detección de submarinos y posteriormente para confirmar algunas consecuencias geofísicas de la teoría de la tectónica de placas. Estos magnetómetros consisten en un pequeño núcleo ferromagnético rodeado por dos devanados de alambre. Por uno de los devanados circula una corriente alterna que provoca ciclos alternados de magnetización hasta la saturación en el núcleo, acompañados de una corriente inducida en el otro devanado. Esta corriente se mide a su vez. Cuando los devanados son iguales y el dispositivo no se halla expuesto a un campo externo, las dos corrientes se equilibran. Pero cuando el dispositivo se encuentra en un campo externo estático con una componente no nula en dirección del núcleo, éste se saturará con mayor facilidad en el sentido del campo que en oposición a él, y las corrientes en los devanados presentarán un desbalance que depende de la intensidad del campo externo y permite medirla.

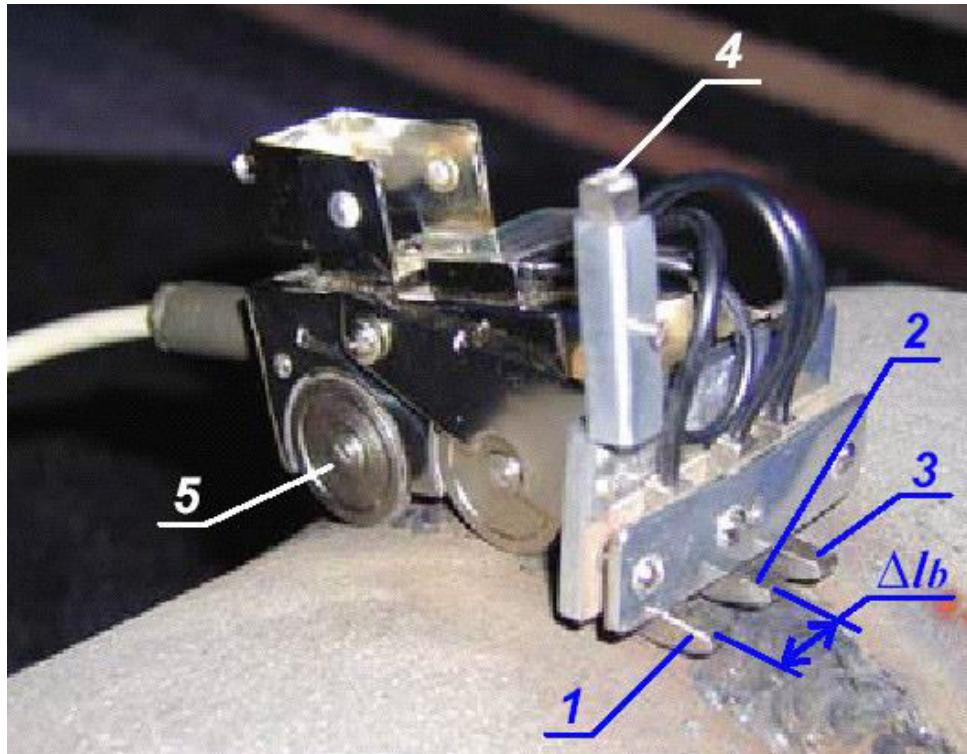


Figura 4: Los elementos 1, 2, 3, 4 portan magnetómetros de compuerta de flujo. Los magnetómetros localizados en 1, 2, 3 miden el campo de fuga más el campo magnético externo. El magnetómetro situado en 4 mide el campo magnético externo solamente. La rueda 5 lleva un medidor de distancia recorrida.

Δl_b: distancia entre magnetómetros de compuerta de flujo.

(Tomado de la norma ISO-24497-3:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory - Part 3: Inspection of welded joints).

(4) Algunas aplicaciones del método de la memoria magnética de los metales.

Ahora se consideran algunas aplicaciones del método, con foco en la inspección de tuberías aéreas, subterráneas o subacuáticas.

Para inspeccionar kilómetros de tubería de gasoductos, oleoductos o poliductos se trabaja en dos etapas.

La primera, análoga a la exploración geofísica aero-magnética, se lleva a cabo mediante dos magnetómetros portátiles que los operadores correspondientes desplazan a lo largo y en forma equidistante, a los lados del ducto y a cierta distancia del mismo (generalmente a distancias inferiores a 15 diámetros). Dependiendo de las interferencias externas y otras dificultades que puedan aparecer, se pueden inspeccionar de 3 a 7 km de tubería por día. Se detectan posibles zonas problemáticas. En la etapa siguiente estas zonas se estudian con métodos locales, como el método MMM utilizando un procedimiento de contacto o métodos de ensayo no destructivo clásicos como por ejemplo ultrasonidos.

El instrumento de medición remota mide el campo magnético total, suma del campo terrestre, el debido a la magnetización uniforme de la tubería, el asociado con posibles interferencias externas y el que interesa desde la perspectiva de los ensayos no destructivos, debido a la concentración de tensiones.

Se han puesto a punto procedimientos efectivos para filtrar las componentes del campo magnético no asociadas a las concentraciones de tensiones [1], [2].

Cuando se pueden eliminar esas componentes no pertinentes, en general resulta posible identificar con precisión la región en la que se presentan las concentraciones de tensiones u otras situaciones que modifican localmente la distribución del campo de fuga.

Si se aplica el método MMM en la segunda etapa⁶, se puede confirmar y cuantificar la concentración de tensiones. El procedimiento usual consiste en realizar una serie de escaneos circunferenciales y/o longitudinales abarcando la totalidad de un tramo del caño. La distancia entre escaneos debe ser adecuada como para no perder información relevante pero no incluir información redundante innecesaria. Se la puede ajustar a partir de mediciones preliminares *in situ*.

Entre los defectos o anomalías que pueden hallarse se encuentran pérdidas de metal (frecuentemente debido a procesos de corrosión localizada),

⁶ Lo cual en el caso de tuberías enterradas requiere abrir una zanja para dejar al descubierto la zona en la que se identificó una posible concentración de tensiones y poder operar allí con magnetómetros de contacto, ultrasonidos u otro método de ensayo no destructivo que pudiera resultar apropiado.

fisuras y otras discontinuidades, fallas geométricas y abolladuras y perturbaciones en el estado de tensiones de la pared no asociadas con los defectos mencionados. La Figura 5 presenta un esquema de los resultados de las dos etapas de inspección magnética de un tramo de tubería enterrada.

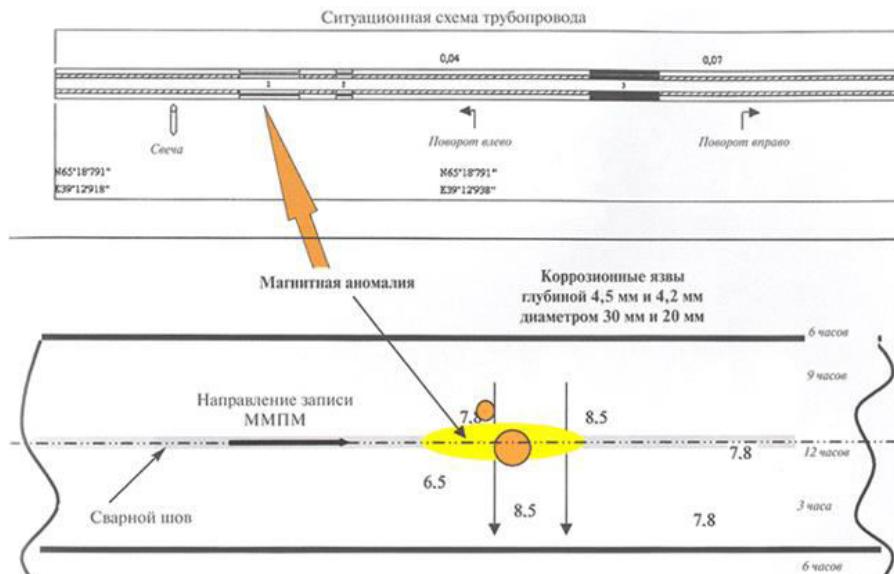


Figura 5: Resultados de las dos etapas de inspección magnética de un tramo de tubería (Gentileza del Dr. Evgueni Gorhokov, de Ingeniería de Gas y Petróleo S.R.L. y Energodiagnóstika).

La parte de arriba corresponde a la inspección a distancia. La flecha gruesa indica una anomalía magnética detectada desde la superficie.

La parte de abajo corresponde a la inspección por contacto propia del método de la memoria magnética de los metales. La flecha fina que termina en una región elíptica indica la zona de concentración de tensiones causante de la anomalía magnética. Los círculos corresponden a dos defectos debidos a procesos de corrosión localizada, uno de 30 mm de diámetro y 4.5 mm de profundidad y el otro de 20 mm de diámetro y 4,2 mm de profundidad, corroborados mediante un ensayo ultrasónico.

A partir de los escaneos se construyen magnetogramas. Cuando los escaneos son circunferenciales, se superponen en una misma gráfica los

valores del campo en cada sección, para un conjunto de secciones adyacentes, en función de la posición en la periferia de esa misma sección transversal del caño. Se añade las derivadas del campo a lo largo del eje de la tubería y/o en dirección transversal al eje, estimada en cada punto a partir del cociente incremental calculado para puntos adyacentes.

La Figura 6 muestra dos magnetogramas construidos a partir de 8 escaneos de una tubería. El primero no presenta anomalías, mientras que el segundo indica la presencia de una zona de concentración de tensiones marcada por un rectángulo.

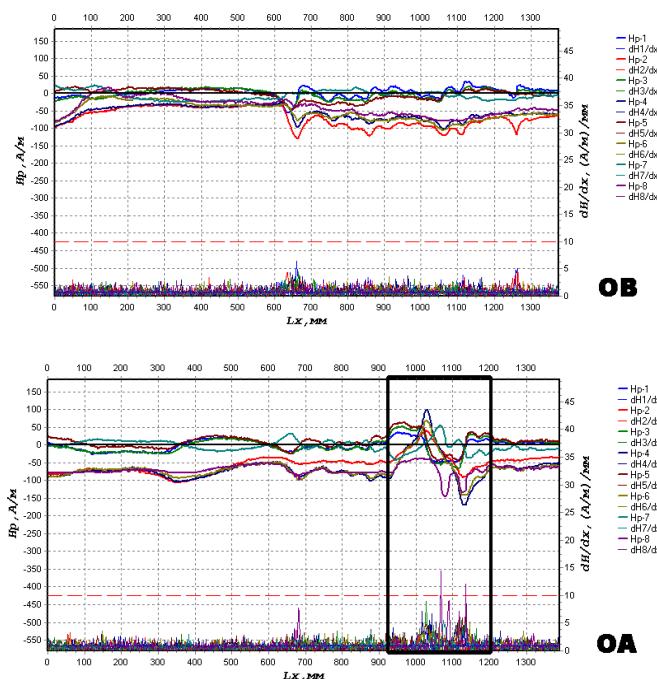


Figura 6: Ejemplos de magnetogramas utilizados en el método MMM.

A partir de las mediciones del magnetómetro de contacto y de información sobre la presión de operación de la tubería, su presión de diseño, el intervalo de tiempo entre la puesta en funcionamiento y la inspección de la tubería mediante el método MMM, la distancia entre escaneos, el gradiente longitudinal del campo magnético y una medida de la concentración local

de tensiones, se puede construir un índice F [2]. Este índice se relaciona con el estado local de tensiones (elástico, plástico o crítico) y permite definir un nivel de peligro, que puede estar asociado a un problema existente o a un estado local del material que precede a la aparición de problemas en el futuro. La Figura 7 esquematiza la relación entre el campo magnético, la presión en la tubería y el índice F .

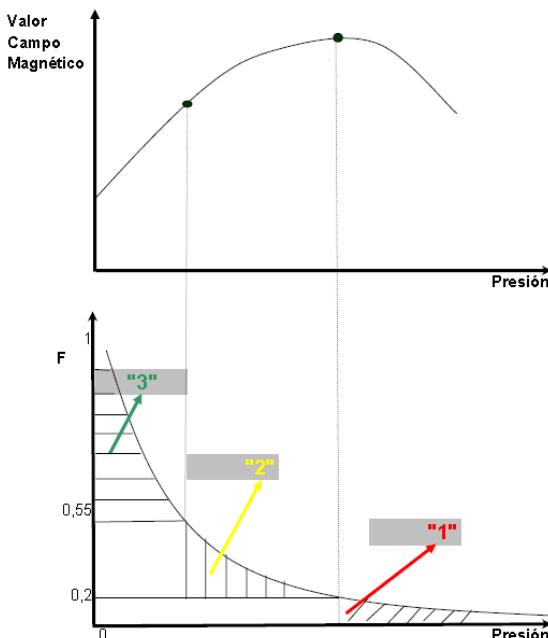


Figura 7: Relaciones entre el campo asociado a la concentración de tensiones, la presión de operación y el índice F relacionado con el riesgo mecánico.

El valor calculado para el índice F se ubica en una de tres clases: clase 3 que corresponde a un estado bueno desde el punto de vista de la mecánica de materiales (F comprendido entre 0.75 y 1), clase 2 que corresponde a la presencia de anomalías poco significativas pero que deberían ser controladas periódicamente (F comprendido entre 0.45 y 0.75), y la clase 1 que corresponden a la presencia de defectos significativos que requieren la reparación inmediata o el reemplazo de un tramo de tubería (F inferior a 0.45).

(5) La memoria magnética de los metales desde la perspectiva de la ciencia de materiales.

El análisis termodinámico convencional no permite abordar los problemas de la historia mecánica, térmica y magnética del metal, problemas que son centrales para la comprensión de las posibilidades y las limitaciones del método de ensayo no destructivo basado en la memoria magnética de los metales.

Para discutir estos problemas es conveniente analizar brevemente la estructura de dominios de los cuerpos ferro-magnéticos, así como el tipo y la distribución de defectos estructurales en los cuerpos poli-cristalinos, utilizados como piezas de máquinas y elementos estructurales. Cabe señalar que tanto las tensiones internas como los límites de los granos se pueden reducir, en última instancia, a propiedades de los defectos estructurales.

Considérese un material calentado por encima de su temperatura de Curie, como ocurre durante algunos procesos de soldadura o de tratamiento térmico, que luego se enfriá por debajo de la misma en presencia del campo magnético terrestre (del orden de los 0.3 gauss).

Se producen así un conjunto de alteraciones en el material que se conocen como **para-proceso** [5].

En el entorno de la temperatura de Curie el cuerpo pasa del estado paramagnético al estado ferromagnético con un cambio de volumen relacionado con el establecimiento de las interacciones entre los espines denominadas de intercambio.

Este fenómeno se denomina magneto-estricción del para-proceso y es numéricamente mucho mayor que el cambio de volumen del cuerpo imantado a temperaturas bien por debajo de la de Curie (magneto-estricción técnica).

De las relaciones de reciprocidad termodinámicas se desprende que el cambio en la deformación por unidad de variación del campo magnético local es igual al cambio en la magnetización por unidad de variación en el esfuerzo mecánico local [6], [7].

Una consecuencia de esta igualdad es que, por ser la deformación por unidad de variación del campo magnético mucho mayor durante el para-proceso, el efecto magneto-elástico (la variación en la magnetización local

del material asociada con una variación en el estado de esfuerzos local) es mucho mayor durante el para-proceso. Y esto se verifica tanto para el efecto magneto-elástico asociado con las tensiones debidas a las cargas externas como al asociado con las tensiones internas.

Entonces el efecto del campo magnético terrestre, que no es significativo en las condiciones de la imantación técnica, es considerable en las condiciones del para-proceso.

La influencia del campo terrestre se combina con los elementos propios de la aleación que van a originar la textura cristalina y con los defectos estructurales que nacen durante el para-proceso, determinando la estructura de dominios y los detalles de la magnetización natural.

Una vez enfriado el material en el campo terrestre, si no se aplican campos artificiales intensos, la estructura de dominios magnéticos queda (por lo menos en parte) congelada. Consideradas como sistemas mecánicos, las paredes de los dominios se mueven en un campo de energía potencial que presenta numerosos mínimos separados por barreras. Estas barreras se producen debido a concentraciones de tensiones (aglomeración de dislocaciones) y a las inclusiones de material no magnético. Si se aplica un campo magnético externo pequeño, el desplazamiento de la pared es proporcional al campo, y cuando este cesa, vuelve a su posición de equilibrio en uno de los mínimos del potencial.

De ahí la estabilidad de la estructura de dominios del cuerpo ferromagnético, a temperaturas bien por debajo de la de Curie, en presencia de campos débiles como el de la Tierra.

Las perturbaciones en la magnetización natural adquirida durante el para-proceso, por efecto magneto-elástico, por lo general indican la presencia de regiones de concentración de tensiones.

Por otra parte, los procesos de deformación en frío aumentan la densidad y provocan la aglomeración de las dislocaciones, con la consiguiente concentración de tensiones internas, lo que se asocia con perturbaciones (mensurables a través del campo de fuga) en la magnetización del cuerpo.

Entonces se produce una **modificación de la energía elástica que se extiende por la misma región donde se produce la perturbación magnética**. Por otra parte, las inclusiones, las fisuras y las cavidades producen modificaciones en el estado de tensiones en puntos próximos (no necesariamente tensiones internas), lo cual también se traduce en una variación de la energía elástica del cuerpo y en la posibilidad de definir

una **región de influencia mecánica del defecto**. La modificación en el estado de tensiones (concentración o liberación) en la región de influencia mecánica produce una cierta magnetización asociada en la misma región espacial que se puede medir como una perturbación en el campo de fuga en el aire, por encima de la región donde el estado de esfuerzos mecánicos ha sufrido una variación significativa.

Por tanto, puede definirse una **región de influencia magnética** asociada al defecto, en la cual la magnetización local presenta una perturbación significativa.

Para obtener una descripción más precisa de la perturbación magnética el campo en el aire se puede expresar como una suma de términos, cada uno de los cuales corresponde a un multipolo: dipolo, cuadrupolo, octupolo, etc. Los parámetros de estos multipolos magnéticos se pueden estimar a partir de las mediciones del campo magnético en el aire, en las proximidades del defecto, utilizando un procedimiento de ajuste no lineal que se propone y se explica en [7].

A una distancia lo bastante grande de la región de influencia magnética asociada al defecto predomina el efecto del término dipolar. Un poco más cerca comienza a incidir el término cuadripolar. Más cerca aún se detecta el efecto del término de octupolo. En general los datos experimentales no permiten una estimación razonablemente precisa de los parámetros de los términos posteriores al octupolo [7].

(6) Conclusiones

(a) El método de ensayo no destructivo que emplea la memoria magnética de los metales presenta las siguientes ventajas prácticas:

-No requiere la magnetización artificial de la pieza ensayada.

-No requiere otra preparación de la pieza que la limpieza de la zona donde se realizan los escaneos.

-Se puede aplicar a tuberías (o estructuras) que se encuentran operando sin necesidad de alterar las condiciones de operación.

-Permite la evaluación de conjuntos de defectos dentro de una misma anomalía magnética y detecta la mayoría de los defectos de interés.

-Se puede combinar eficazmente con otros métodos de ensayo no destructivo.

- Permite detectar regiones de concentración de esfuerzos **antes** de que surjan defectos macroscópicos relevantes.

(b) Presenta algunas limitaciones importantes en la práctica:

-Resulta difícil o imposible detectar con este método defectos pequeños en áreas sin tensiones. Por ejemplo, pequeños agujeros o picaduras de corrosión aislados y de dimensiones inferiores al mm.

-Solamente se aplica en piezas de materiales ferromagnéticos.

-Para relacionar los resultados del ensayo con los defectos de interés desde el punto de vista de la evaluación de la capacidad de servicio de una tubería, estructura o máquina, a menudo (aunque no siempre) se deben emplear criterios empíricos o semi-empíricos cuyo manejo adecuado requiere, por el momento, una formación especializada muy superior a la necesaria para aplicar con propiedad los métodos de ensayo no destructivos clásicos.

(c) A cada defecto significativo único o defecto equivalente obtenido por combinación de defectos próximos, se le puede asociar una región R_{mag} que puede considerarse como una **región de influencia magnética** del defecto. Esta región se superpone con una **región de influencia mecánica** asociada al defecto. La relación entre los **parámetros de multipolo** (que caracterizan, desde el punto de vista magnético, la perturbación en el aire en las cercanías del cuerpo ferromagnético debida a la región de influencia de un defecto único o combinación de defectos próximos) con los **tipos de defectos** definibles a nivel macro y mesoscópico constituye un problema de investigación abierto que presenta interés práctico.

Referencias bibliográficas

- [1] A. Dubov, "Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT methods", Montreal World Conference on Non-Destructive Testing, August 2004.
- [2] A. Dubov, Al. A. Dubov y S. Kolokolnikov, "Method of metal magnetic memory and inspection instruments". Training handbook. Moscú: ZAO "TISSO", Rusia, 2008.
- [3] Ch. Kittel, "Introduction to solid state physics", Wiley, N.Y., USA, 1990.
- [4] L. Landau and E. Lifchitz, "Électrodynamique des milieux continus", Mir, Moscú, Rusia, 1969.
- [5] B.G. Livshits, V.S. Kraposhin, Y.L. Linetski, "Propiedades físicas de metales y aleaciones", Mir, Moscú, Rusia, 1982.
- [6] R. Suárez Ántola y D. Suárez Bagnasco, "The Physical Foundations of Magnetic Memory Method for NDT", Segundas Jornadas Técnicas de la Asociación Uruguaya de Ensayos No Destructivos, Montevideo Uruguay, setiembre de 2004.
- [7] R. Suárez Ántola "El método de la memoria magnética de Dubov y las regiones de influencia de los defectos significativos", "The e-Journal & Database of Nondestructive Testing", Nov. 2007, Vol. 12, Nº 11, ISSN 1435-4934.
- [8] V.T. Vlasov, "Physical basis of the method of metal magnetic memory – own magnetic field of dislocations" in the 3rd International Conference on Diagnostics of Equipment and Structures using the Magnetic Memory Method, Moscú, Rusia, Febrero 2003.